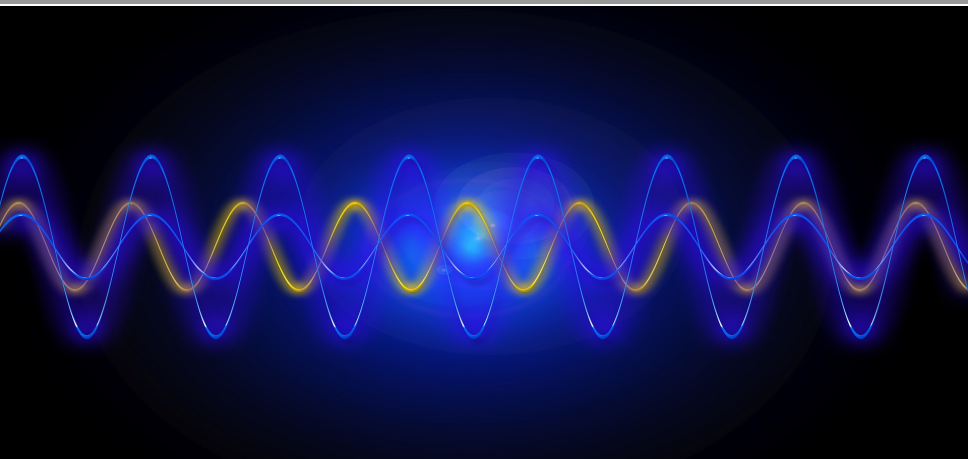


o pomiarze i o dekoherencji

Jacek Matulewski [Karolina Słowik](#) Jarosław Zaremba Jacek Jurkowski

MECHANIKA KWANTOWA DLA NIEFIZYKÓW



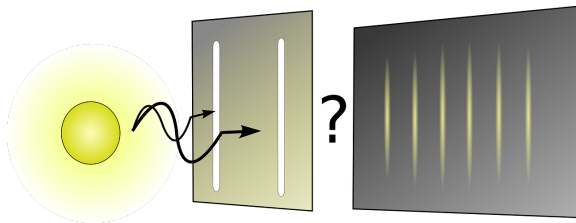
- ▶ pomiar
- ▶ dekoherencja

► **pomiar**

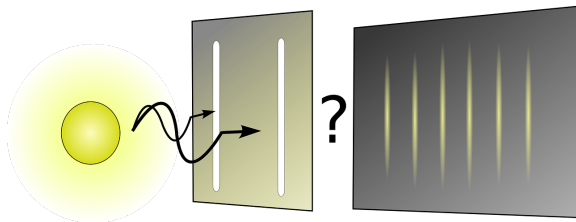
- kolaps
- nieoznaczoność
- paradoksy

► dekoherencja

Przykładowy eksperyment: doświadczenie Younga

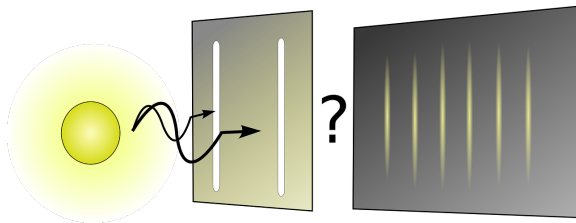


Przykładowy eksperyment: doświadczenie Younga



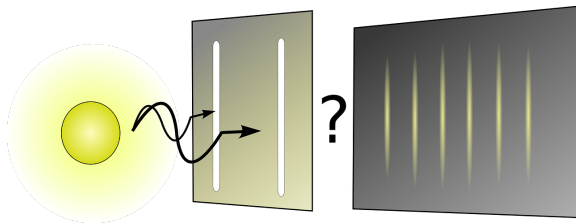
- Jakie cząstki są przepuszczane przez szczeliny?

Przykładowy eksperyment: doświadczenie Younga



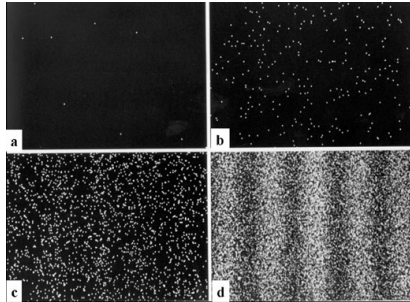
- ▶ Jakie cząstki są przepuszczane przez szczeliny?
- ▶ Jakie wyniki obserwujemy dla różnych natężeń wiązki?

Przykładowy eksperyment: doświadczenie Younga

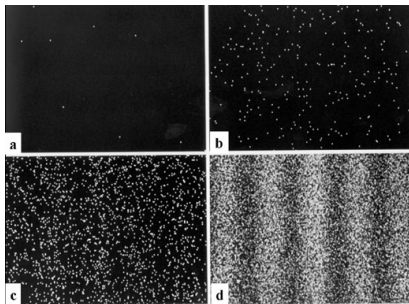


- ▶ Jakie cząstki są przepuszczane przez szczeliny?
- ▶ Jakie wyniki obserwujemy dla różnych natężeń wiązki?
- ▶ Jaki wpływ na wynik ma obecność obserwatora?
Dlaczego ziarna piasku nie interferują?

Dlaczego dla małych natężeń wiązki, zamiast widzieć blady obraz interferencyjny, widzimy pojedyncze kropki?



Dlaczego dla małych natężeń wiązki, zamiast widzieć błady obraz interferencyjny, widzimy pojedyncze kropki?



Problemy interpretacyjne:

- ▶ co się dzieje w momencie pomiaru?
- ▶ dlaczego nie obserwujemy bezpośrednio f. falowej? Czy istnieje?

Redukcja (kolaps) funkcji falowej

Oddziaływanie z układem pomiarowym
zmienia stan układu kwantowego.

Redukcja (kolaps) funkcji falowej

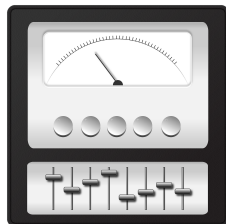
Oddziaływanie z układem pomiarowym
zmienia stan układu kwantowego.

Przed pomiarem:

$$|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$$



Po pomiarze: $|\psi_j\rangle$
z prawdopodobieństwem $|c_j|^2$



Redukcja (kolaps) funkcji falowej

Oddziaływanie z układem pomiarowym
zmienia stan układu kwantowego.

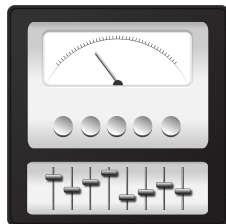
Przed pomiarem:

$$|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$$



Po pomiarze: $|\psi_j\rangle$

z prawdopodobieństwem $|c_j|^2$



Od tej pory układ jest w innym stanie niż był wcześniej.

Dokładniej o teorii pomiaru

- ▶ Wielkości fizyczne w mechanice kwantowej są **skwantowane**: mogą przyjmować pewne wartości z określonego zbioru $\{A_j\}$, np. **energia elektronu na orbicie atomowej** $\{E_j\}_{j=K,L,M,\dots} = \{E_K, E_L, E_M, \dots\}$.
- ▶ Wartościom tym odpowiadają różne **stany/funkcje własne** $|\psi_j\rangle$, tu: **różne orbity** $\{|K\rangle, |L\rangle, |M\rangle, \dots\}$.
- ▶ Stan układu (tu: elektronu) może być **superpozycją** różnych funkcji własnych (tu: **orbit**), o różnych energiach:

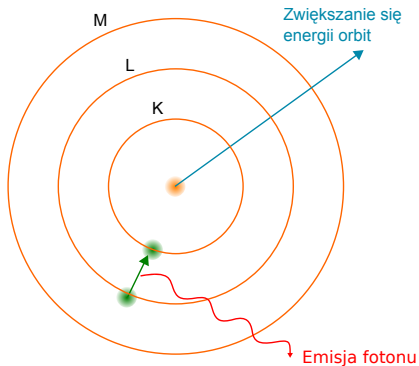
$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle + c_3|\psi_3\rangle + \dots \\ &= c_K|K\rangle + c_L|L\rangle + c_M|M\rangle + \dots \end{aligned}$$

(c_j nazywamy **amplitudami prawdopodobieństwa**)

Dokładniej o teorii pomiaru

- ▶ Wynik pomiaru wielkości fizycznej energii elektronu może dać tylko jedną wartość spośród zbioru wartości własnych (kolaps), np. A_3 (dla elektronu np. E_L).
- ▶ Od tej pory stan układu jest określony odpowiednią funkcją własną $|\psi_3\rangle$ (dla elektronu np. $|L\rangle$).
- ▶ Wielokrotne wykonanie doświadczenia na tak samo przygotowanym układzie owocuje rozkładem wyników pomiaru: A_j (dla elektronu E_j) z prawdopodobieństwem $|c_j|^2$

Przykład: mierzymy energię elektronu na orbicie atomowej



Elektron w stanie:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|K\rangle + \frac{1}{2}|L\rangle - \frac{1}{2}|M\rangle$$

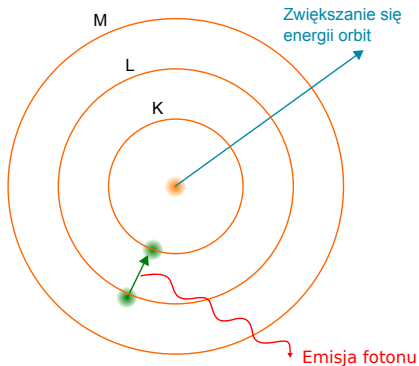
Pomiar da wynik:

E_K z prawd. ...

E_L z prawd. ...

E_M z prawd. ...

Przykład: mierzymy energię elektronu na orbicie atomowej



źródło: Wikipedia, Kimbar

Elektron w stanie:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|K\rangle + \frac{1}{2}|L\rangle - \frac{1}{2}|M\rangle$$

Pomiar da wynik:

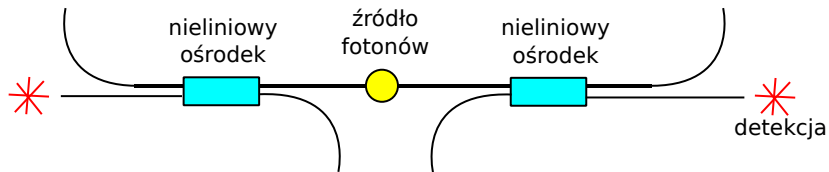
$$E_K \text{ z prawd. } \frac{1}{2} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2$$

$$E_L \text{ z prawd. } \frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^2$$

$$E_M \text{ z prawd. } \frac{1}{4} = \left(-\frac{1}{2}\right)^2$$

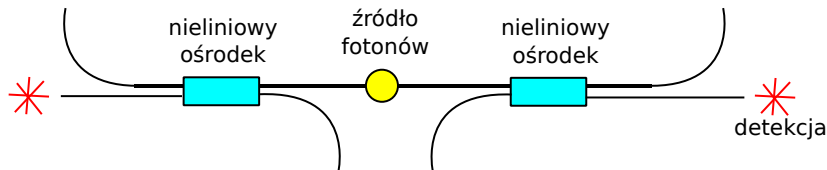
Drugi przykład: pomiar niedestrukcyjny

W mechanice kwantowej trudno zmierzyć układ i mieć układ, ale są na to sposoby:



Drugi przykład: pomiar niedestrukcyjny

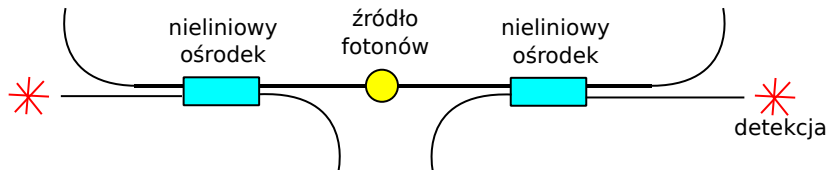
W mechanice kwantowej trudno zmierzyć układ i mieć układ, ale są na to sposoby:



Źródło emituje fotony w stanie $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\leftarrow\rangle + |\rightarrow\rangle)$.

Drugi przykład: pomiar niedestrukcyjny

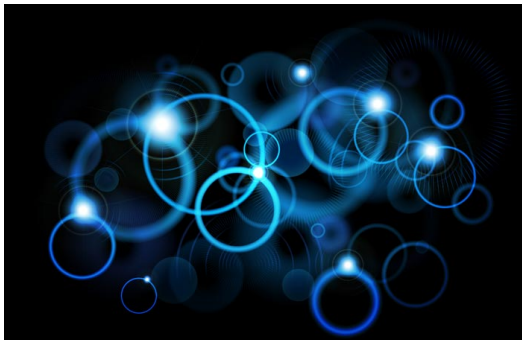
W mechanice kwantowej trudno zmierzyć układ i mieć układ, ale są na to sposoby:



Źródło emituje fotony w stanie $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\leftarrow\rangle + |\rightarrow\rangle)$.

Od momentu kliknięcia jednego z detektorów, ścieżka fotonu ze źródła jest określona.

Dygresja: dziwna metoda
znalezienia drogi w ciemnym pokoju



Dygresja: dziwna metoda znalezienia drogi w ciemnym pokoju



- ▶ Widzimy przedmioty, bo do naszych oczu trafia odbite od nich światło.
- ▶ Obserwacja jest pomiarem.

Trzeci przykład: doświadczenie Younga z obserwatorem

Dlaczego obecność obserwatora wpływa na wynik doświadczenia?

Trzeci przykład: doświadczenie Younga z obserwatorem

Dlaczego obecność obserwatora wpływa na wynik doświadczenia?

Obserwacja jest pomiarem

Trzeci przykład: doświadczenie Younga z obserwatorem

Dlaczego obecność obserwatora wpływa na wynik doświadczenia?

Obserwacja jest pomiarem

- mierzymy przez którą szczelinę przechodzi foton

Trzeci przykład: doświadczenie Younga z obserwatorem

Dlaczego obecność obserwatora wpływa na wynik doświadczenia?

Obserwacja jest pomiarem

- ▶ mierzymy przez którą szczelinę przechodzi foton
- ▶ od tej pory stan fotonu dany nie superpozycją, lecz zredukowaną funkcją

Trzeci przykład: doświadczenie Younga z obserwatorem

Dlaczego obecność obserwatora wpływa na wynik doświadczenia?

Obserwacja jest pomiarem

- ▶ mierzymy przez którą szczelinę przechodzi foton
- ▶ od tej pory stan fotonu dany nie superpozycją, lecz zredukowaną funkcją
- ▶ foton porusza się określoną drogą → brak interferencji

Zasada nieoznaczoności Heisenberga

Istnieją pary wielkości fizycznych,
których nie można zmierzyć jednocześnie.

Wyjaśnienie z bilardem

Jak zmierzyć położenie poruszającej się cząstki?

Wyjaśnienie z bilardem

Jak zmierzyć położenie poruszającej się cząstki?

Najprościej: rozproszyć na niej foton.

Wyjaśnienie z bilardem

Jak zmierzyć położenie poruszającej się cząstki?

Najprościej: rozproszyć na niej foton.

- ▶ niczym w bilardzie, uderzenie fotonu zmienia położenie cząstki

Wyjaśnienie z bilardem

Jak zmierzyć położenie poruszającej się cząstki?

Najprościej: rozproszyć na niej foton.

- ▶ niczym w bilardzie, uderzenie fotonu zmienia położenie cząstki

Jak zmierzyć prędkość cząstki?

Wyjaśnienie z bilardem

Jak zmierzyć położenie poruszającej się cząstki?

Najprościej: rozproszyć na niej foton.

- ▶ niczym w bilardzie, uderzenie fotonu zmienia położenie cząstki

Jak zmierzyć prędkość cząstki?

Trzeba zarejestrować położenie w chwilach A i B .

- ▶ Pomiar położenia wpływa na położenie i na pęd (prędkość).

Wyjaśnienie z bilardem

Jak zmierzyć położenie poruszającej się cząstki?

Najprościej: rozproszyć na niej foton.

- ▶ niczym w bilardzie, uderzenie fotonu zmienia położenie cząstki

Jak zmierzyć prędkość cząstki?

Trzeba zarejestrować położenie w chwilach A i B .

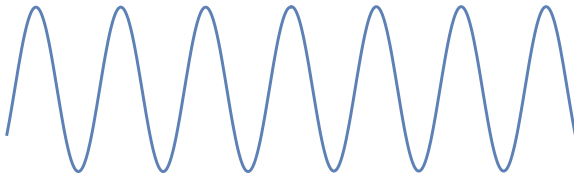
- ▶ Pomiar położenia wpływa na położenie i na pęd (prędkość).

Tu: kwantowy bilard.

Stan fotonu niedokładnie znany $\rightarrow$ pomiar niedokładny.

Wyjaśnienie z interferencją

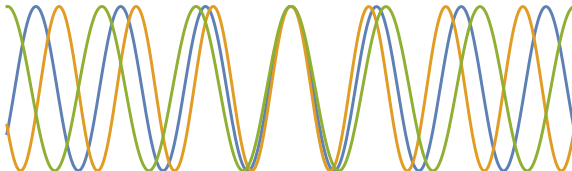
Interferencja (złożenie) funkcji falowych o określonych pędach daje funkcję o (lepiej) określonym położeniu:



$$\lambda = \frac{\hbar}{mv}$$

Wyjaśnienie z interferencją

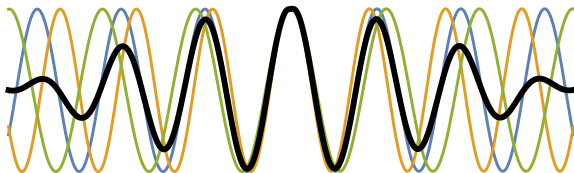
Interferencja (złożenie) funkcji falowych o określonych pędach daje funkcję o (lepiej) określonym położeniu:



$$\lambda = \frac{\hbar}{mv}$$

Wyjaśnienie z interferencją

Interferencja (złożenie) funkcji falowych o określonych pędach daje funkcję o (lepiej) określonym położeniu:



$$\lambda = \frac{\hbar}{mv}$$

Im lepiej określone położenie, tym gorzej określony pęd (i odwrotnie).

Wyjaśnienie matematyczne (na przykładzie)

Chcemy zmierzyć dwie wielkości fizyczne A i B

- ▶ A ma wartości własne $A_1, A_2, A_3, \dots$
i odpowiednie funkcje własne $|A_1\rangle, |A_2\rangle, |A_3\rangle, \dots$
- ▶ B ma wartości własne $B_1, B_2, B_3, \dots$
i odpowiednie funkcje własne $|B_1\rangle, |B_2\rangle, |B_3\rangle, \dots$

Funkcje $|A_i\rangle$ i $|B_j\rangle$ **są różne**.

Wyjaśnienie matematyczne (na przykładzie)

Chcemy zmierzyć dwie wielkości fizyczne A i B

- ▶ A ma wartości własne $A_1, A_2, A_3, \dots$
i odpowiednie funkcje własne $|A_1\rangle, |A_2\rangle, |A_3\rangle, \dots$
- ▶ B ma wartości własne $B_1, B_2, B_3, \dots$
i odpowiednie funkcje własne $|B_1\rangle, |B_2\rangle, |B_3\rangle, \dots$

Funkcje $|A_i\rangle$ i $|B_j\rangle$ **są różne**.

Stan cząstki dany jest funkcją falową $|\psi\rangle$.

- ▶ Mierzymy najpierw wielkość A .

Wyjaśnienie matematyczne (na przykładzie)

Chcemy zmierzyć dwie wielkości fizyczne A i B

- ▶ A ma wartości własne $A_1, A_2, A_3, \dots$
i odpowiednie funkcje własne $|A_1\rangle, |A_2\rangle, |A_3\rangle, \dots$
- ▶ B ma wartości własne $B_1, B_2, B_3, \dots$
i odpowiednie funkcje własne $|B_1\rangle, |B_2\rangle, |B_3\rangle, \dots$

Funkcje $|A_i\rangle$ i $|B_j\rangle$ **są różne**.

Stan cząstki dany jest funkcją falową $|\psi\rangle$.

- ▶ Mierzemy najpierw wielkość A .
- ▶ Rozkład f. falowej za pomocą (w bazie)
stanów własnych wielkości A :

$$|\psi\rangle = c_{A1}|A_1\rangle + c_{A2}|A_2\rangle + c_{A3}|A_3\rangle + \dots$$

Wyjaśnienie matematyczne (na przykładzie)

Chcemy zmierzyć dwie wielkości fizyczne A i B

- ▶ A ma wartości własne $A_1, A_2, A_3, \dots$
i odpowiednie funkcje własne $|A_1\rangle, |A_2\rangle, |A_3\rangle, \dots$
- ▶ B ma wartości własne $B_1, B_2, B_3, \dots$
i odpowiednie funkcje własne $|B_1\rangle, |B_2\rangle, |B_3\rangle, \dots$

Funkcje $|A_i\rangle$ i $|B_j\rangle$ **są różne**.

Stan cząstki dany jest funkcją falową $|\psi\rangle$.

- ▶ Mierzemy najpierw wielkość A .
- ▶ Rozkład f. falowej za pomocą (w bazie)
stanów własnych wielkości A :

$$|\psi\rangle = c_{A1}|A_1\rangle + c_{A2}|A_2\rangle + c_{A3}|A_3\rangle + \dots$$

- ▶ Wynik np. $A_2 \rightarrow \dots$

Wyjaśnienie matematyczne (na przykładzie)

Chcemy zmierzyć dwie wielkości fizyczne A i B

- ▶ A ma wartości własne $A_1, A_2, A_3, \dots$
i odpowiednie funkcje własne $|A_1\rangle, |A_2\rangle, |A_3\rangle, \dots$
- ▶ B ma wartości własne $B_1, B_2, B_3, \dots$
i odpowiednie funkcje własne $|B_1\rangle, |B_2\rangle, |B_3\rangle, \dots$

Funkcje $|A_i\rangle$ i $|B_j\rangle$ **są różne**.

Stan cząstki dany jest funkcją falową $|\psi\rangle$.

- ▶ Mierzmy najpierw wielkość A .
- ▶ Rozkład f. falowej za pomocą (w bazie)
stanów własnych wielkości A :

$$|\psi\rangle = c_{A1}|A_1\rangle + c_{A2}|A_2\rangle + c_{A3}|A_3\rangle + \dots$$

- ▶ Wynik np. $A_2 \rightarrow$ kolaps f. falowej np. do stanu $|A_2\rangle$

Wyjaśnienie matematyczne (na przykładzie), c.d.

- Następnie mierzymy wielkość B .

Wyjaśnienie matematyczne (na przykładzie), c.d.

- ▶ Następnie mierzymy wielkość B .
- ▶ Rozkład stanu po kolapsie w bazie f. własnych wielkości B :

$$|A_2\rangle = c_{B1}|B_1\rangle + c_{B2}|B_2\rangle + c_{B3}|B_3\rangle + \dots$$

Wyjaśnienie matematyczne (na przykładzie), c.d.

- ▶ Następnie mierzymy wielkość B .
- ▶ Rozkład stanu po kolapsie w bazie f. własnych wielkości B :

$$|A_2\rangle = c_{B1}|B_1\rangle + c_{B2}|B_2\rangle + c_{B3}|B_3\rangle + \dots$$

- ▶ Wielkość A jest określona, ale B nie jest (superpozycja).

Wyjaśnienie matematyczne (na przykładzie), c.d.

- ▶ Następnie mierzymy wielkość B .
- ▶ Rozkład stanu po kolapsie w bazie f. własnych wielkości B :

$$|A_2\rangle = c_{B1}|B_1\rangle + c_{B2}|B_2\rangle + c_{B3}|B_3\rangle + \dots$$

- ▶ Wielkość A jest określona, ale B nie jest (superpozycja).
- ▶ Pomiar wielkości $B \rightarrow \dots$

Wyjaśnienie matematyczne (na przykładzie), c.d.

- ▶ Następnie mierzymy wielkość B .
- ▶ Rozkład stanu po kolapsie w bazie f. własnych wielkości B :

$$|A_2\rangle = c_{B1}|B_1\rangle + c_{B2}|B_2\rangle + c_{B3}|B_3\rangle + \dots$$

- ▶ Wielkość A jest określona, ale B nie jest (superpozycja).
- ▶ Pomiar wielkości $B \rightarrow$ kolaps np. do stanu $|B_1\rangle$.

Wyjaśnienie matematyczne (na przykładzie), c.d.

- ▶ Następnie mierzymy wielkość B .
- ▶ Rozkład stanu po kolapsie w bazie f. własnych wielkości B :

$$|A_2\rangle = c_{B1}|B_1\rangle + c_{B2}|B_2\rangle + c_{B3}|B_3\rangle + \dots$$

- ▶ Wielkość A jest określona, ale B nie jest (superpozycja).
- ▶ Pomiar wielkości $B \rightarrow$ kolaps np. do stanu $|B_1\rangle$.
- ▶ Nowy stan nie jest f. własną wielkości A , czyli teraz B jest określone, ale A nie:

$$|B_1\rangle = \tilde{c}_{A1}|A_1\rangle + \tilde{c}_{A2}|A_2\rangle + \tilde{c}_{A3}|A_3\rangle + \dots$$

Wyjaśnienie matematyczne (na przykładzie), c.d.

- ▶ Następnie mierzymy wielkość B .
- ▶ Rozkład stanu po kolapsie w bazie f. własnych wielkości B :

$$|A_2\rangle = c_{B1}|B_1\rangle + c_{B2}|B_2\rangle + c_{B3}|B_3\rangle + \dots$$

- ▶ Wielkość A jest określona, ale B nie jest (superpozycja).
- ▶ Pomiar wielkości $B \rightarrow$ kolaps np. do stanu $|B_1\rangle$.
- ▶ Nowy stan nie jest f. własną wielkości A , czyli teraz B jest określone, ale A nie:

$$|B_1\rangle = \tilde{c}_{A1}|A_1\rangle + \tilde{c}_{A2}|A_2\rangle + \tilde{c}_{A3}|A_3\rangle + \dots$$

W jakiej sytuacji obie wielkości mogą być określone jednocześnie?

Wyjaśnienie matematyczne (na przykładzie), c.d.

- ▶ Następnie mierzymy wielkość B .
- ▶ Rozkład stanu po kolapsie w bazie f. własnych wielkości B :

$$|A_2\rangle = c_{B1}|B_1\rangle + c_{B2}|B_2\rangle + c_{B3}|B_3\rangle + \dots$$

- ▶ Wielkość A jest określona, ale B nie jest (superpozycja).
- ▶ Pomiar wielkości $B \rightarrow$ kolaps np. do stanu $|B_1\rangle$.
- ▶ Nowy stan nie jest f. własną wielkości A , czyli teraz B jest określone, ale A nie:

$$|B_1\rangle = \check{c}_{A1}|A_1\rangle + \check{c}_{A2}|A_2\rangle + \check{c}_{A3}|A_3\rangle + \dots$$

W jakiej sytuacji obie wielkości mogą być określone jednocześnie?
Gdy wielkości A i B mają wspólne funkcje własne,
np. pęd i energia cząstki swobodnej.

Wnioski o zasadzie nieoznaczoności

- ▶ Istnieją pary wielkości fizycznych, których nie można zmierzyć jednocześnie.
- ▶ W ogólności pomiar wielkości A wpływa na wielkość B i odwrotnie (mówimy, że A i B **nie komutują**).
- ▶ Gdy istnieją wspólne funkcje własne, można jednocześnie zmierzyć obie wielkości.

Pary niekomutujących wielkości fizycznych

- ▶ położenie i pęd w tym samym kierunku
- ▶ energia (częstotliwość) i czas życia
(np. jak długo elektron przebywa na wzbudzonej orbicie)
- ▶ natężenie i faza pola elektrycznego
- ▶ składowe momentu pędu tej samej cząstki
(jak szybko rotuje wokół różnych kierunków)

Paradoks kota Schrödingera

Przed pomiarem stan cząstki kwantowej jest dany superpozycją różnych możliwości. Przy pomiarze kolaps.

Paradoks kota Schrödingera

Przed pomiarem stan cząstki kwantowej jest dany superpozycją różnych możliwości. Przy pomiarze kolaps.

Schrödinger: Czy kot w pudełku z trującą fiolką jest żywy i martwy jednocześnie?



Paradoks kota Schrödingera

Przed pomiarem stan cząstki kwantowej jest dany superpozycją różnych możliwości. Przy pomiarze kolaps.

Czy but w zamkniętym pudełku jest lewy i prawy jednocześnie?



Paradoks kota Schrödingera

Przed pomiarem stan cząstki kwantowej jest dany superpozycją różnych możliwości. Przy pomiarze kolaps.

Czy but w zamkniętym pudełku jest lewy i prawy jednocześnie?

NIE: but jest albo lewy, albo prawy, nawet przed otwarciem pudełka.

Cząstki klasyczne mają określony stan, niezależnie od pomiaru.



Paradoks kota Schrödingera

Przed pomiarem stan cząstki kwantowej jest dany superpozycją różnych możliwości. Przy pomiarze kolaps.

Czy but w zamkniętym pudełku jest lewy i prawy jednocześnie?

NIE: but jest albo lewy, albo prawy, nawet przed otwarciem pudełka.

Cząstki klasyczne mają określony stan, niezależnie od pomiaru.



Praw makro- i mikroświata są różne.

Opis w kategorii prawdopodobieństw to nie tylko nasza niewiedza.

Paradoks kota Schrödingera

Przed pomiarem stan cząstki kwantowej jest dany superpozycją różnych możliwości. Przy pomiarze kolaps.

Czy but w zamkniętym pudełku jest lewy i prawy jednocześnie?

NIE: but jest albo lewy, albo prawy, nawet przed otwarciem pudełka.

Cząstki klasyczne mają określony stan, niezależnie od pomiaru.



Praw makro- i mikroświata są różne.

Opis w kategorii prawdopodobieństw to nie tylko nasza niewiedza.

Rozwiązanie paradoksu: dekoherencja.

Paradoks przyjaciela Wignera

Przyjaciół Wignera wykonuje doświadczenie i telefonuje do Wignera oznajmiając mu wynik. Kiedy następuje kolaps?



Paradoks przyjaciela Wignera

Przyjaciół Wignera wykonuje doświadczenie i telefonuje do Wignera oznajmiając mu wynik.
Kiedy następuje kolaps?



Rozwiązanie: Doświadczenia z opóźnionym wyborem pokazują, że gdy gdziekolwiek we Wszechświecie istnieje informacja o stanie układu (niezależnie od tego czy obserwator ją pozna czy nie), zachodzi kolaps.

Zatem kolaps zaszedł, mimo że Wigner jeszcze o tym nie wie.

Pomiar: podsumowanie

- ▶ Oddziaływanie z układem pomiarowym zmienia stan układu kwantowego.
- ▶ Wielkości fizyczne są skwantowane. Dozwolone wyniki pomiarów należą do zbioru wartości własnych danej wielkości.
- ▶ Wartościom własnym odpowiadają funkcje własne. Gdy jedna wartość własna odpowiada więcej niż jednej funkcji, mówimy że jest **zdegenerowana**.

Pomiar: podsumowanie

- ▶ W dowolnym momencie, stan układu jest superpozycja funkcji własnych wybranej wielkości (różne przedstawienia dla różnych wielkości).
- ▶ W wyniku pomiaru realizuje się jedna z możliwości: wielkość fizyczna przybiera wartość. Kolejne pomiary tej samej wielkości dadzą ten sam wynik.
- ▶ Rozkład prawdopodobieństw jest odtwarzany w serii pomiarów na identycznie przygotowanych układach kwantowych.
(Pojedynczy pomiar w doświadczeniu Younga daje kropkę, ale wielokrotne powtórzenie odtwarza prążki interferencyjne.)

Pomiar: podsumowanie

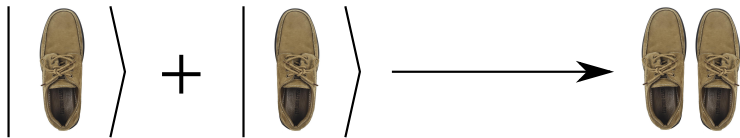
- ▶ Istnieją pary wielkości fizycznych, których nie można zmierzyć jednocześnie.
- ▶ W ogólności pomiar wielkości A wpływa na wielkość B i odwrotnie.
- ▶ Gdy A i B komutują (istnieją wspólne funkcje własne), można jednocześnie mierzyć obie wielkości.
- ▶ Prawa makro- i mikroświata są różne.

- ▶ pomiar

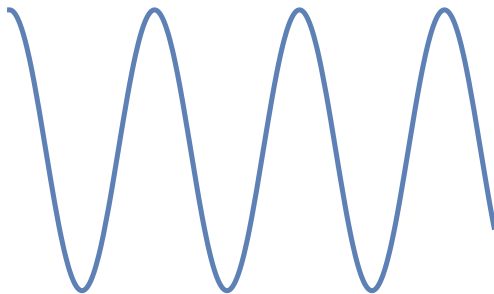
- ▶ **dekoherencja**

- ▶ przyczyny: fluktuacje w otoczeniu układu kwantowego
 - ▶ skutki: redukcja do praw klasycznej mechaniki

Dekoherencja to proces niszczący
zdolność do interferencji kwantowej

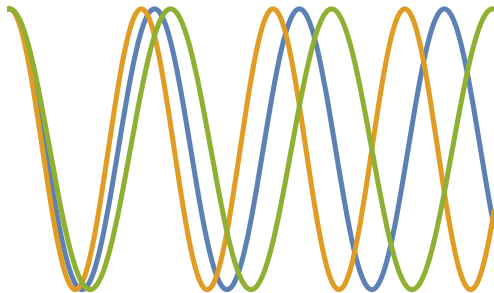


Dekoherencja w przestrzeni



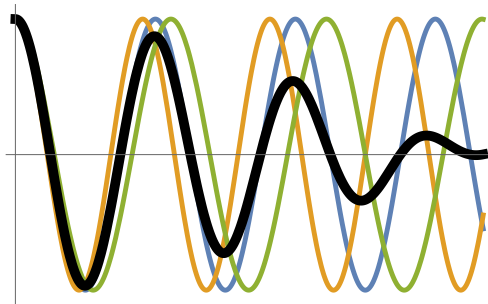
$$\lambda = \frac{\hbar}{mv}$$

Dekoherencja w przestrzeni



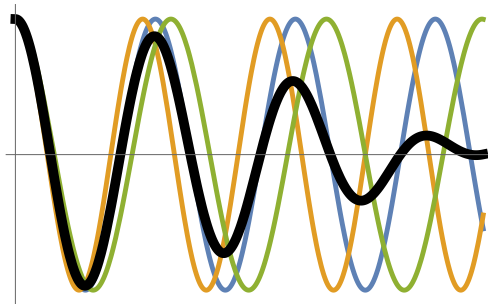
$$\lambda = \frac{\hbar}{mv}$$

Dekoherencja w przestrzeni



$$\lambda = \frac{\hbar}{mv}$$

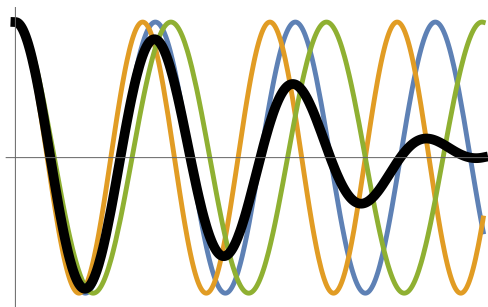
Dekoherencja w przestrzeni



$$\lambda = \frac{\hbar}{mv}$$

faza

Dekoherencja w przestrzeni

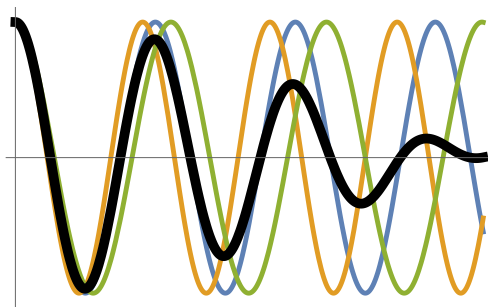


$$\lambda = \frac{\hbar}{mv}$$

faza

spójność (koherencja)

Dekoherencja w przestrzeni



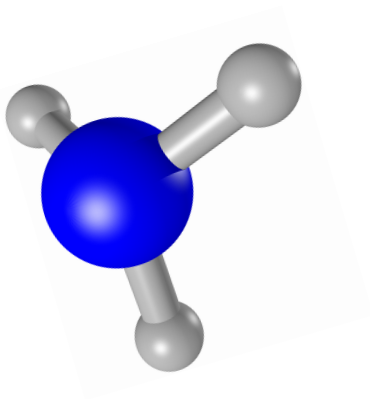
$$\lambda = \frac{\hbar}{mv}$$

faza

spójność (koherencja)

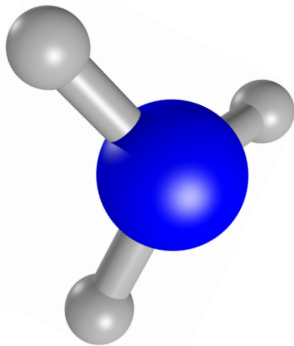
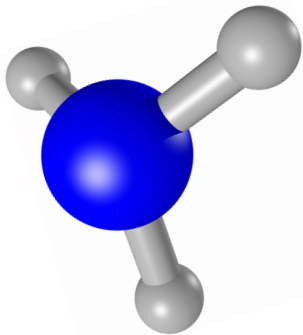
fluktuacje

Dekoherencja w czasie



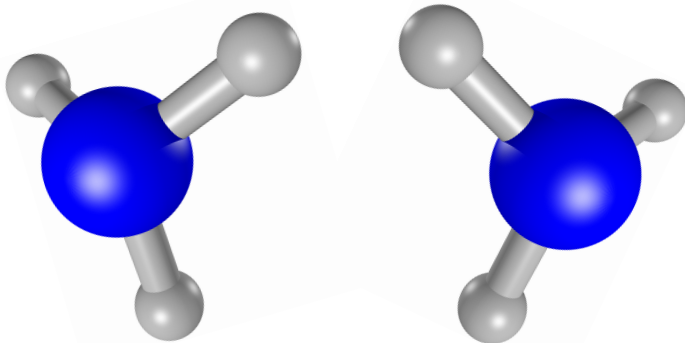
Amoniak (NH_3)

Dekoherencja w czasie



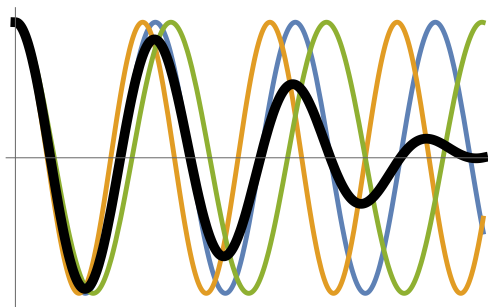
Amoniak (NH₃)

Dekoherencja w czasie



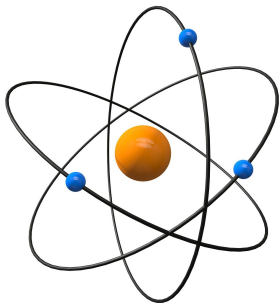
Amoniak (NH₃) wykonuje oscylacje tunelując przez barierę potencjału.

Dekoherencja w czasie



Amoniak (NH_3) wykonuje oscylacje tunelując przez barierę potencjału.

Dekoherencja jest winna różnic
praw fizycznych w skali mikro i makro.

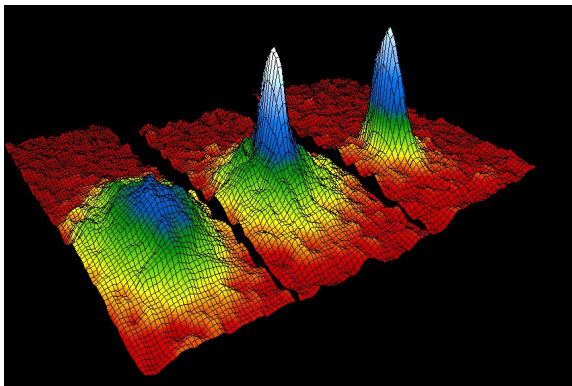


rozmiar atomu wodoru:
0.1 nm



rozmiar ziarna piasku:
 $0.1 \text{ mm} = \text{milion} \times \text{rozmiar atomu}$

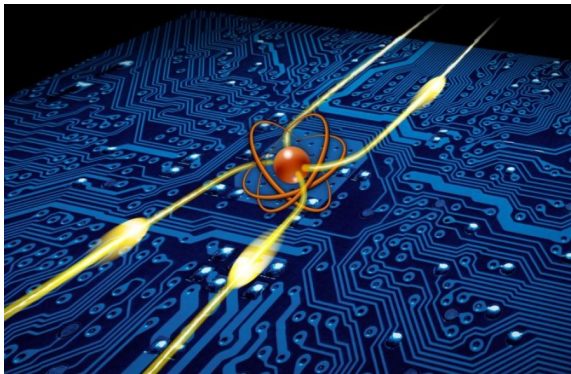
Duże układy kwantowe: zamrożone chmury atomów



NIST Image Gallery

Kiedy temperatura maleje, atomy kondensują się w jednorodną chmurę opisaną kwantowym rozkładem prędkości.
Jej rozmiary są makroskopowe!

Dekoherencja jako wyzwanie



sciencedaily.com, Welzmann Institute of Science

Kwantowa bramka logiczna: atom wykonuje operacje na fotonach w zależności od ich stanu.

Dekoherencja - podsumowanie

- ▶ Dekoherencja niszczy zdolność do interferencji kwantowej.

Dekoherencja - podsumowanie

- ▶ Dekoherencja niszczy zdolność do interferencji kwantowej.
- ▶ Przyczyną dekoherencji jest nieoznaczoność warunków, w jakich znajduje się układ kwantowy (np. fluktuacje otaczającego pola powodują niespójne oscylacje f. falowej).

Dekoherencja - podsumowanie

- ▶ Dekoherencja niszczy zdolność do interferencji kwantowej.
- ▶ Przyczyną dekoherencji jest nieoznaczoność warunków, w jakich znajduje się układ kwantowy (np. fluktuacje otaczającego pola powodują niespójne oscylacje f. falowej).
- ▶ Dekoherencja jest bardzo silna w "dużych" układach
 - ▶ przyczyna: powtarzający się raz za razem kolaps f. falowej → właściwości fizyczne układu dobrze określone (np. trajektoria),

Dekoherencja - podsumowanie

- ▶ Dekoherencja niszczy zdolność do interferencji kwantowej.
- ▶ Przyczyną dekoherencji jest nieoznaczoność warunków, w jakich znajduje się układ kwantowy (np. fluktuacje otaczającego pola powodują niespójne oscylacje f. falowej).
- ▶ Dekoherencja jest bardzo silna w "dużych" układach
 - ▶ przyczyna: powtarzający się raz za razem kolaps f. falowej → właściwości fizyczne układu dobrze określone (np. trajektoria),
 - ▶ wyzwanie technologiczne dla współczesnej nauki,

Dekoherencja - podsumowanie

- ▶ Dekoherencja niszczy zdolność do interferencji kwantowej.
- ▶ Przyczyną dekoherencji jest nieoznaczoność warunków, w jakich znajduje się układ kwantowy (np. fluktuacje otaczającego pola powodują niespójne oscylacje f. falowej).
- ▶ Dekoherencja jest bardzo silna w "dużych" układach
 - ▶ przyczyna: powtarzający się raz za razem kolaps f. falowej → właściwości fizyczne układu dobrze określone (np. trajektoria),
 - ▶ wyzwanie technologiczne dla współczesnej nauki,
 - ▶ wyjątek: kondensat Bosego - Einsteina.